

Prof. dr hab. inż. Jacek Stadnicki  
jstadnicki@ath.bielsko.pl  
Akademia Techniczno-Humanistyczna

Dr inż. Ireneusz Wróbel  
iwrobel@ath.bielsko.pl  
Akademia Techniczno-Humanistyczna

## OCENA WYTRZYMAŁOŚCI SZYNOPRZEWODU W STANIE ZWARCIA

### Streszczenie:

Szynoprzewody, służące do przewodzenia dużych prądów, powinny zapewniać bezpieczną eksploatację również podczas przewodzenia udarowego prądu zwarcia – kiedy działa na nie siła pola elektromagnetycznego o dużej wartości. W artykule przedstawiono dyskretny model MES do analizy naprężeń i deformacji segmentu szynoprzewodu w stanie zwarcia. Ponieważ analizowana konstrukcja okazała się bezpieczna, wyznaczono największy rozstaw podpór szynoprzewodu, przy którym jego eksploatacja jest jeszcze bezpieczna. Powiększenie rozstawu podpór szynoprzewodu pozwala na zwiększenie długości segmentu i obniżenie jego kosztów.

**Słowa kluczowe:** model MES, szynoprzewód, wytrzymałość

## EVALUATION OF THE FEEDER DUCT STRENGTH DURING SHORT CIRCUIT

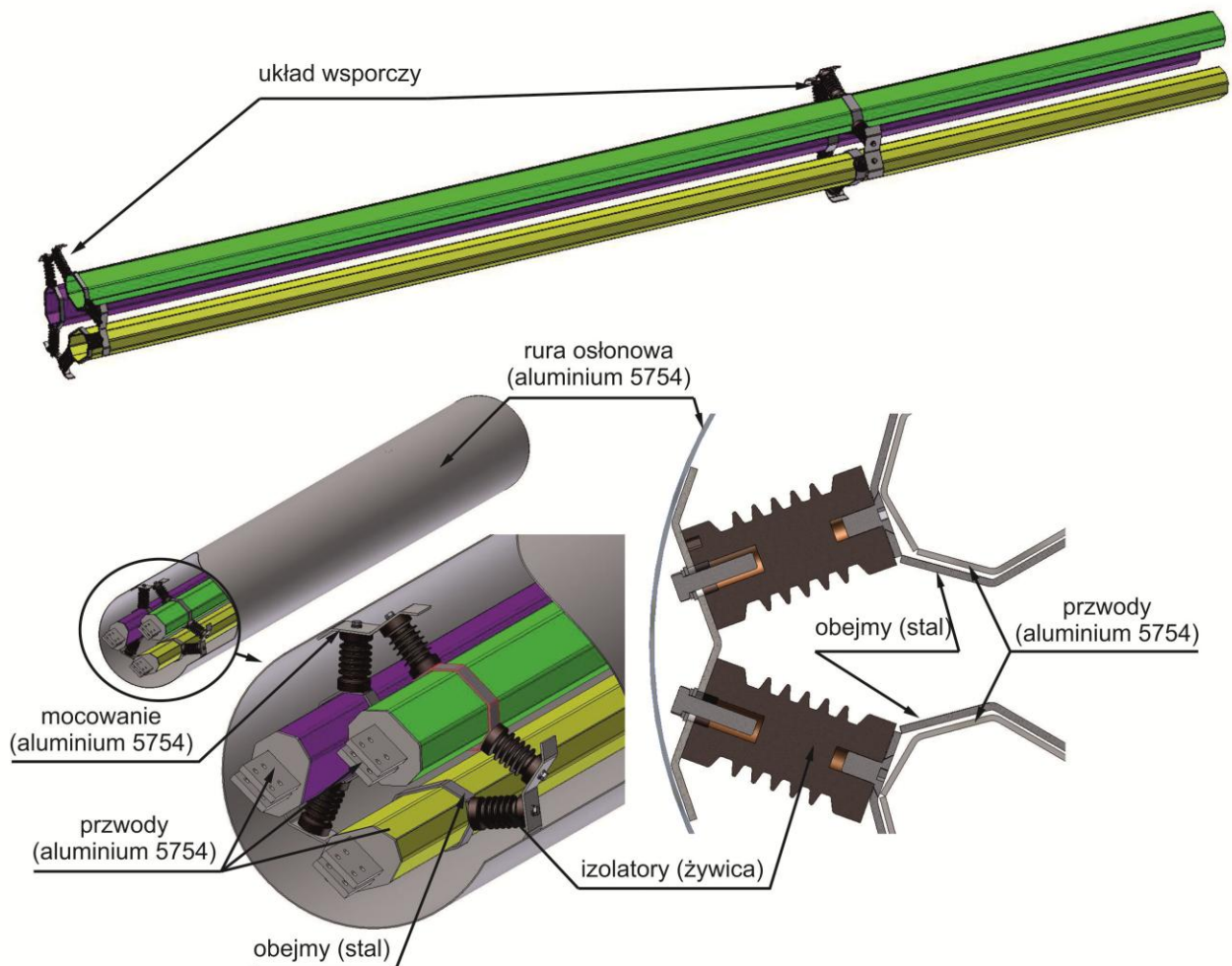
### Summary:

Feeder ducts, used to conduct big currents, should secure safe exploitation even during conducting impact short circuit current – when very big force of electromagnetic field is acting on them. The discrete FEM model for analysis of stress and deformation of the feeder duct segment during short circuit is presented in the paper. Because the analysed feeder duct segment proved safe, the largest spacing between supports of the feeder duct that guarantees safe exploitation was calculated. Enlarging the spacing between supports of the feeder duct makes its length grater and reduces its costs.

**Keywords:** FEM model, feeder duct, strength

## 1.WPROWADZENIE

Szynoprzewód to sztywny segment instalacji elektrycznej służący do przewodzenia dużych prądów. W zależności od przeznaczenia i rodzaju przewodzonego prądu (jedno lub trójfazowy) może on mieć różną postać konstrukcyjną. W referacie przedstawiono dyskretny model obliczeniowy szynoprzewodu do trójfazowego prądu przemiennego, który stosuje się do połączenia generatora prądu w elektrowni ze stacją transformatorową. Oprócz odpowiedniej przewodności, szynoprzewód powinien cechować się również wytrzymałością mechaniczną i sztywnością, tak aby jego eksploatacja była bezpieczna również podczas krótkotrwałego przewodzenia największego możliwego prądu, jaki płynie w stanie zwarcia. Konstrukcję analizowanego szynoprzewodu przedstawia rysunek 1. Szynoprzewód (segment) składa się ze rury osłonowej wykonanej z blachy aluminiowej EN AW-5754 H12. We wnętrzu rury znajdują się trzy przewody (służące do przewodzenia prądu) o kształcie zbliżonym do sześciokąta, które również są wykonane z blachy aluminiowej EN AW-5754 H12. Przewody te są umocowane w rurze osłonowej za pomocą specjalnych stalowych obejm i izolatorów z żywicy epoksydowej w sposób pokazany na rysunku 1.



Rys. 1 Konstrukcja szynoprzewodu

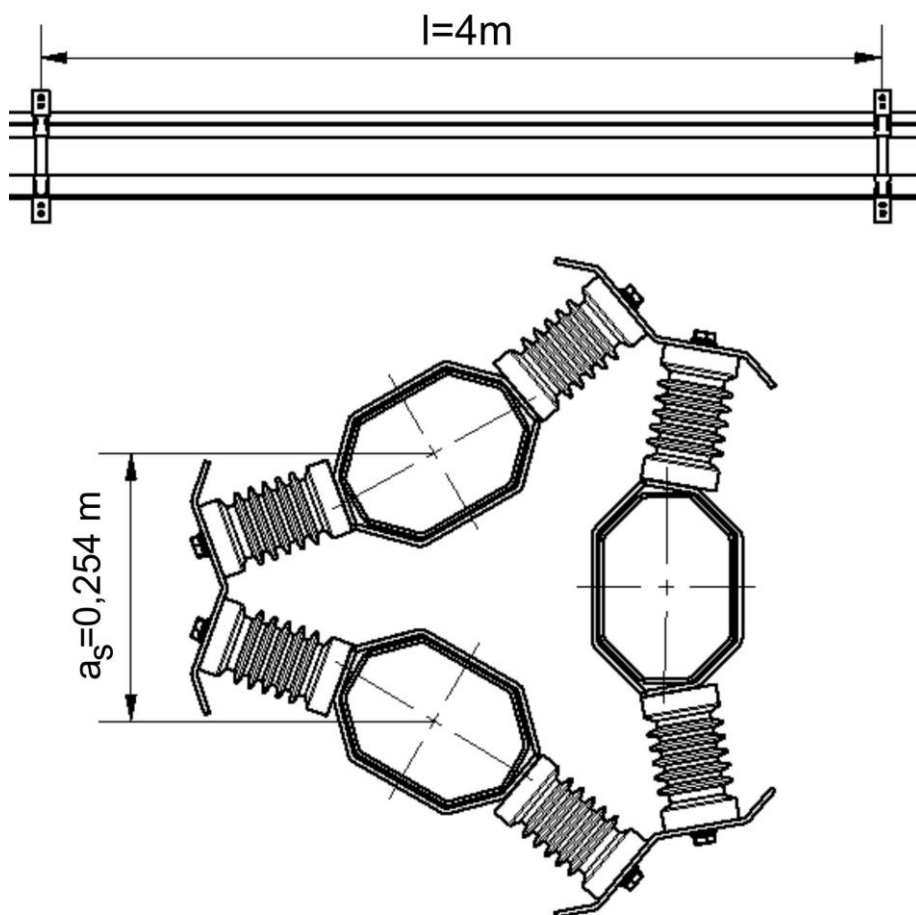
## CEL ANALIZY

Jak już zaznaczono, największe obciążenie przewodów siłami pola elektromagnetycznego występuje podczas krótkotrwałego przewodzenia udarowego prądu zwarcia. Ponieważ taki stan występuje podczas eksploatacji, konstrukcja szynoprzewodu powinna zapewnić jego bezpieczeństwo eksploatacji również podczas takiego stanu. Przyjmując, że przykrój szynoprzewodu nie powinien ulec zmianie, parametrem, który w decydujący sposób wpływa na jego wytrzymałość i sztywność, jest rozstaw  $l$  podpór, z pomocą których mocuje się segmenty szynoprzewodu do ścian, stropów lub innych sztywnych fragmentów budowli.

Wartość szczytowa siły pola elektromagnetycznego, z jaką działają na siebie nawzajem przewody, przez które przepływa udarowy prąd zwarcia, określa norma PN-90/E-05025 [2].

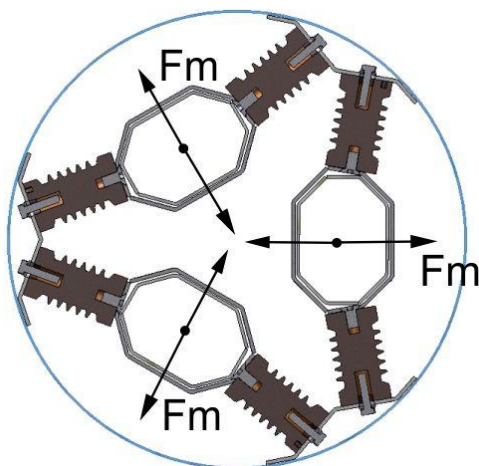
$$F_m = 0,2 \cdot i_{p3}^2 \frac{l}{a_s} 0,87 [N]$$

gdzie:  $i_{p3}$ - prąd udarowy zwarcia trójfazowego symetrycznego,  $kA$ ,  
 $l$ - odstęp między podporami (rys.2),  $m$ ,  
 $a_s$ - odstęp między osiami przewodów (rys.2),  $m$ .



Rys. 2 Wymiary szynoprzewodu potrzebne do obliczenia siły szczytowej

Zakładając, że prąd zwarcia  $i_{p3}$  wynosi  $100kA$ , odstęp  $a_s$  między osiami przewodów wynosi  $0,254m$ , rozstaw  $l$  między podporami wynosi  $4m$ , wartość siły szczytowej podczas zwarcia  $F_m$  jest równa  $27405N$ . Ponieważ prąd jest przemienny, przewody mogą odpychać się jak i przyciągać z siłą  $F_m$ .



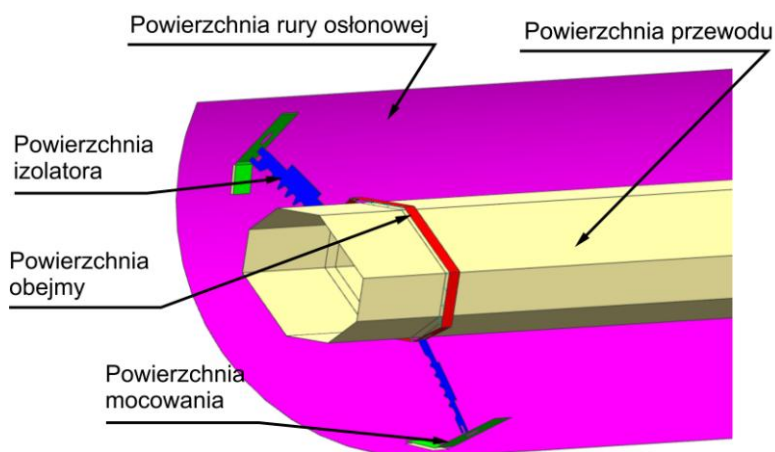
Rys. 3 Działanie siły szczytowej w szynoprzewodzie podczas zwarcia

Celem analizy było sprawdzenie, czy konstrukcja szynoprzewodu zapewnia jego bezpieczną eksploatację również w stanie zwarcia. Z uwagi na bezpieczeństwo, przewody

podczas zwarcia nie mogą zetknąć się ze sobą ani z rurą osłonową. Producent szynoprzewodów doświadczalnie bada wytrzymałość konstrukcji podczas zwarcia. Ponieważ przy niewłaściwym rozstawie podpór szynoprzewód ulega zniszczeniu, doświadczalne wyznaczanie właściwego rozstawu podpór jest kosztowne. Z pomocą opisanego dalej dyskretnego modelu obliczeniowego można prowadzić badania symulacyjne wytrzymałości szynoprzewodu i ustalić odpowiedni z uwagi na bezpieczeństwo eksploatacji rozstaw podpór a także wartości innych parametrów przekroju bez potrzeby przeprowadzania kosztownych badań niszczących. Biorąc pod uwagę złożoną postać konstrukcyjną szynoprzewodu do opracowania modelu obliczeniowego zastosowano metodę elementów skończonych [1].

## MODEL DYSKRETNY SZYNOPRZEWODU

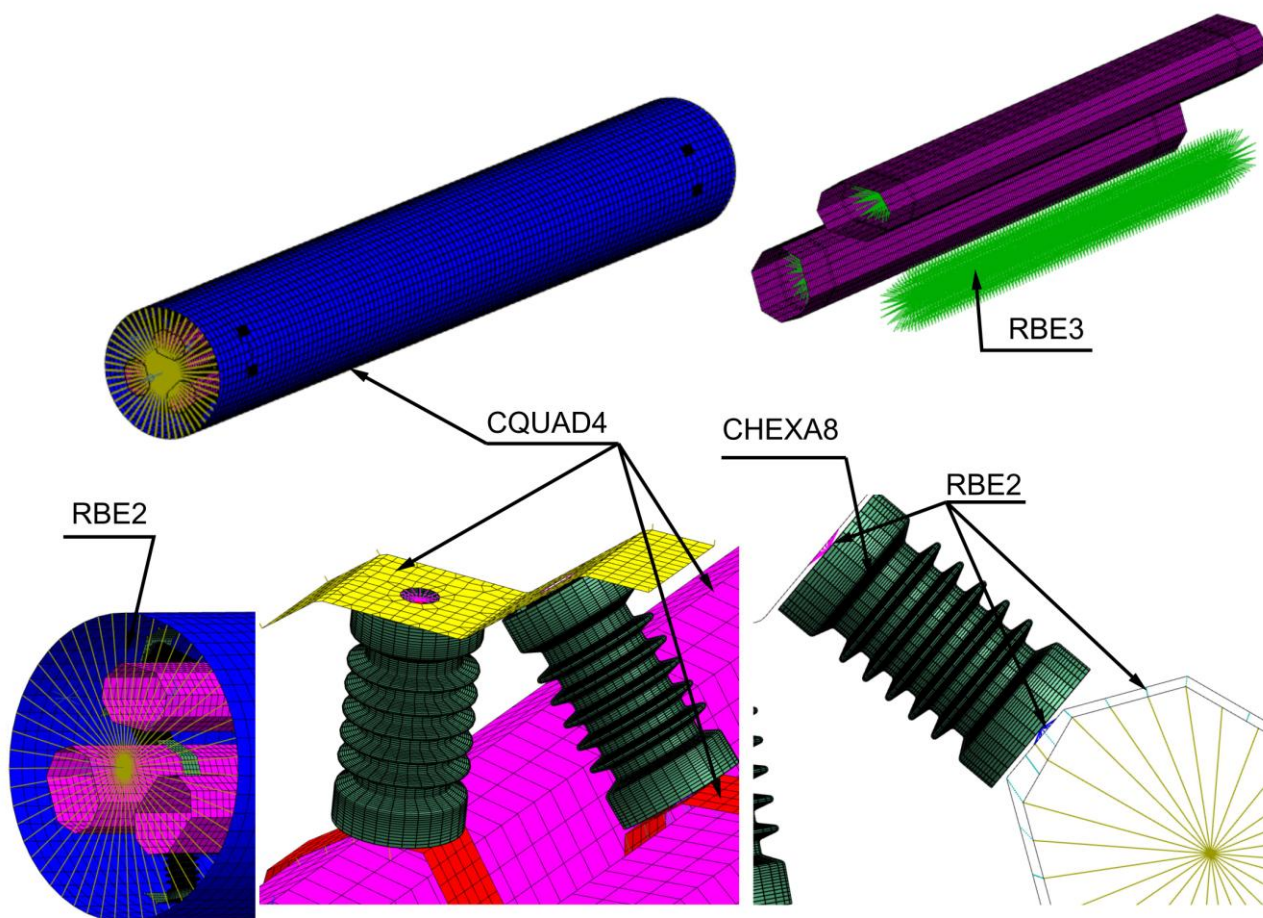
Bazując na trójwymiarowym bryłowym modelu CAD szynoprzewodu, wykonano modele powierzchniowe rury osłonowej, przewodów, obejm, mocowania i izolatora. Model szynoprzewodu składa się z trzech takich samych, rozłożonych równo na obwodzie, przewodów wraz z zamocowaniem i wycinkiem rury osłonowej – wystarczyło zatem zbudować model CAD jednego przewodu z zamocowaniem i wycinkiem rury osłonowej, który pokazano na rysunku 4.



Rys. 4 Model powierzchniowy przewodu z zamocowaniem i wycinkiem rury osłonowej

Tak przygotowany model powierzchniowy przewodu z zamocowaniem i wycinkiem rury osłonowej zdyskretyzowano na elementy skończone, używając systemu *Unigraphics NX* [3]. Rurę osłonową, przewody, obejmy i mocowania zdyskretyzowano czterowęzłowymi elementami płaskimi typu *QUAD4*. Model dyskretny izolatora wykonano w następujących krokach. Najpierw utworzono powierzchnię przekroju ograniczonego osią izolatora i jego obrysem, którą podzielono na czterowęzłowe elementy *QUAD4*. Następnie, wykorzystując operację obrotu płaskich elementów *QUAD4* wokół osi izolatora, utworzono model bryłowy izolatora zbudowany z ośmiowęzłowych elementów przestrzennych typu *CHEXA8*. Połączenie rury osłonowej, przewodów, izolatorów z przewodami, obejmami i mocowaniami zamodelowano wykorzystując dwuwęzłowe elementy *RBE2*, które zapewniają zgodność wielkości węzłowych łączonych węzłów modeli składowych. Na potrzeby podparcia i obciążenia modelu wykonano pomocnicze struktury w formie pęku elementów *RBE2* na brzegach rury osłonowej i *RBE3* wewnątrz przewodów (rys.5). Dzięki takim pomocniczym strukturom wielkość węzłowa – siła z węzła centralnego, jest równomiernie rozkładana na węzły na obwodzie. W podobny sposób warunki brzegowe w węzle centralnym są transformowane do węzłów na obwodzie. Na końcu wykonano operację szyku kołowego i odbicia lustrzanego modelu przewodu z zamocowaniem i

wycinkiem rury osłonowej, po to aby otrzymać kompletny model dyskretny szynoprzewodu, który przedstawiono na rysunku 5.



Rys.5 Model dyskretny szynoprzewodu

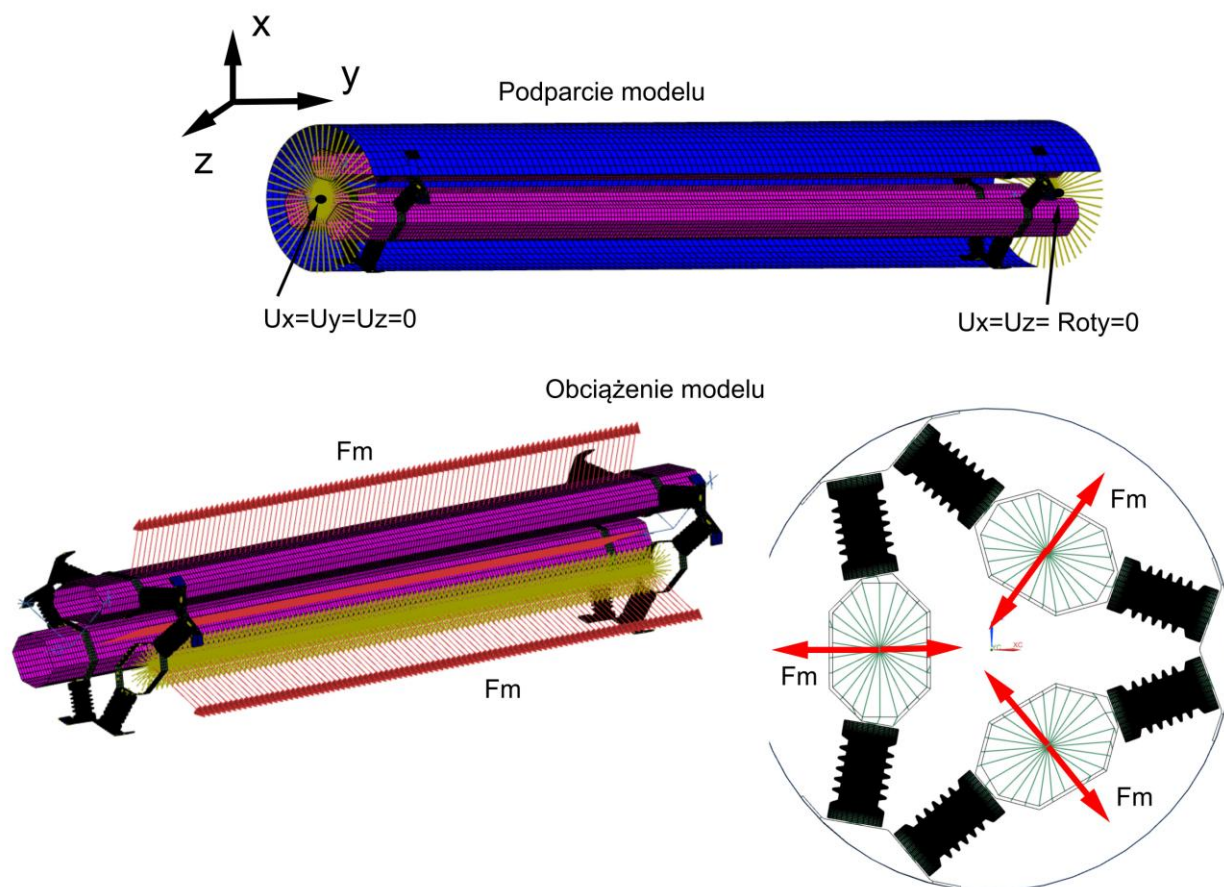
Kompletny model dyskretny szynoprzewodu składał się z około 450 tys. węzłów i ponad 412 tys. elementów skończonych.

Należy zaznaczyć, że model został tak przygotowany aby można było zmieniać rozstaw podpór (izolatorów wraz z obejmami i mocowaniami) i dobrać jego największą wartość z uwagi na bezpieczeństwo eksploatacji w stanie zwarcia.

Modele materiałowe stalowych (obejmy) i aluminiowych części modelu przyjęto korzystając z biblioteki odpowiednich modeli materiałowych programu *Nx Nastran* [3]. Natomiast model materiałowy izolatorów wykonanych ze specjalnej żywicy epoksydowej firmy *Kuvag* przyjęto na podstawie danych producenta.

## WARUNKI BRZEGOWE I ANALIZA MES

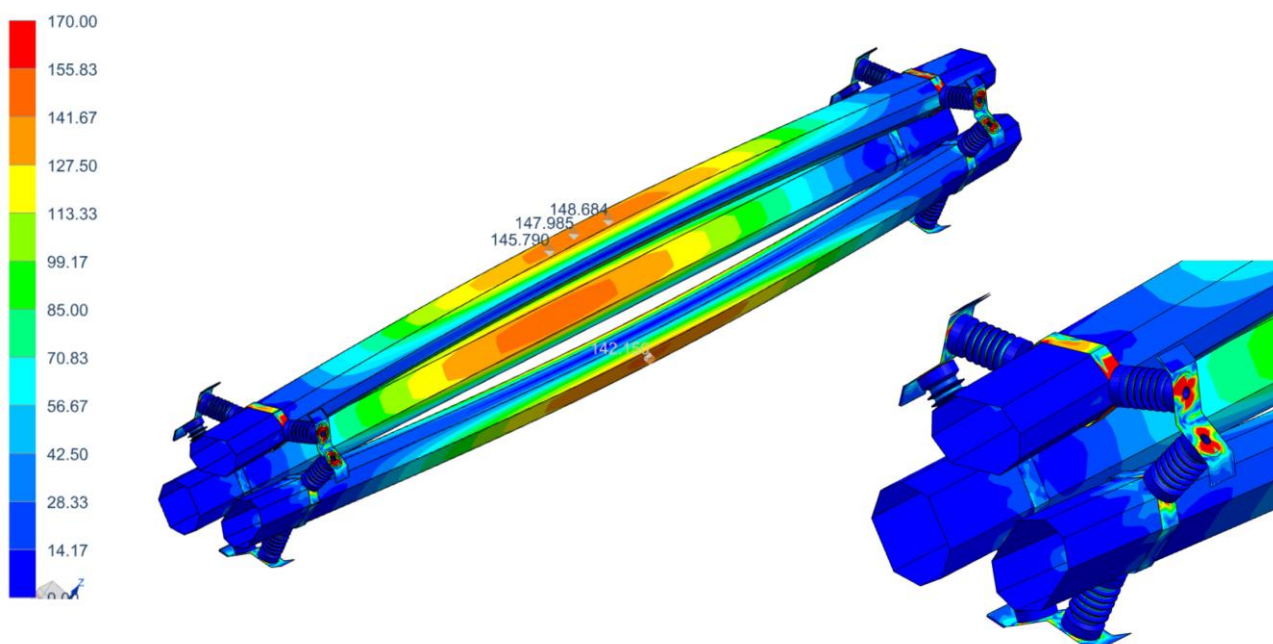
Odtwarzając rzeczywiste warunki pracy, segment szynoprzewodu podparto tak jak belkę podpartą swobodnie, co uzyskano odbierając odpowiednie stopnie swobody węzłom centralnym pomocniczych struktur z elementów *RBE2*. Natomiast siłę szczytową podczas zwarcia  $F_m$  o wartości  $27405N$ , rozłożono równomiernie na węzły centralne pomocniczych struktur z elementów *RBE3* w sposób pokazany na rysunku 6. Tak podparty i obciążony model był rozwiązany z pomocą solvera *NX Nastran*.



Rys. 6 Warunki brzegowe

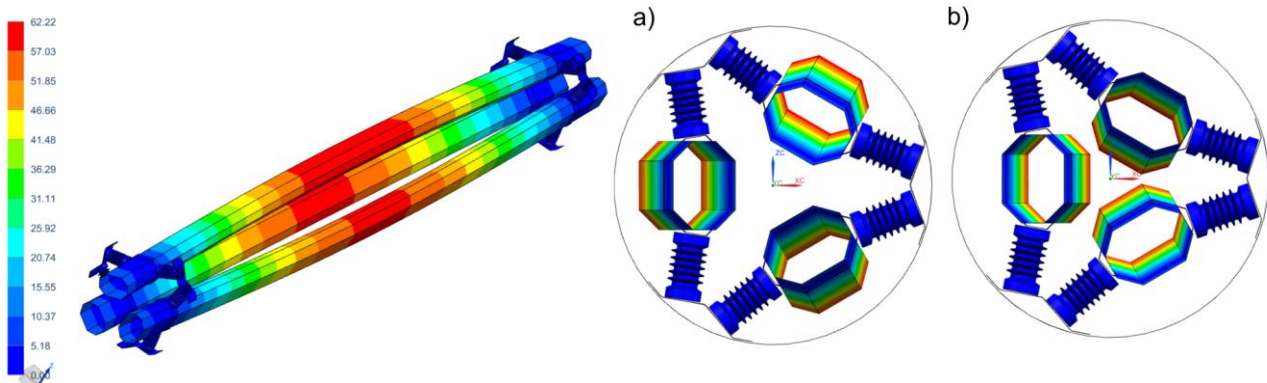
## WYNIKI ANALIZY

Wynikami analizy przedstawiono w formie warstwic naprężeń zredukowanych Hubera-von Missesa oraz deformacji. Na rysunku 7 przedstawiono warstwicę naprężeń zredukowanych dla modelu szynoprzewodu o nominalnych wymiarach.



Rys. 7 Warstwicę naprężeń zredukowanych dla modelu o wymiarach nominalnych, *MPa*

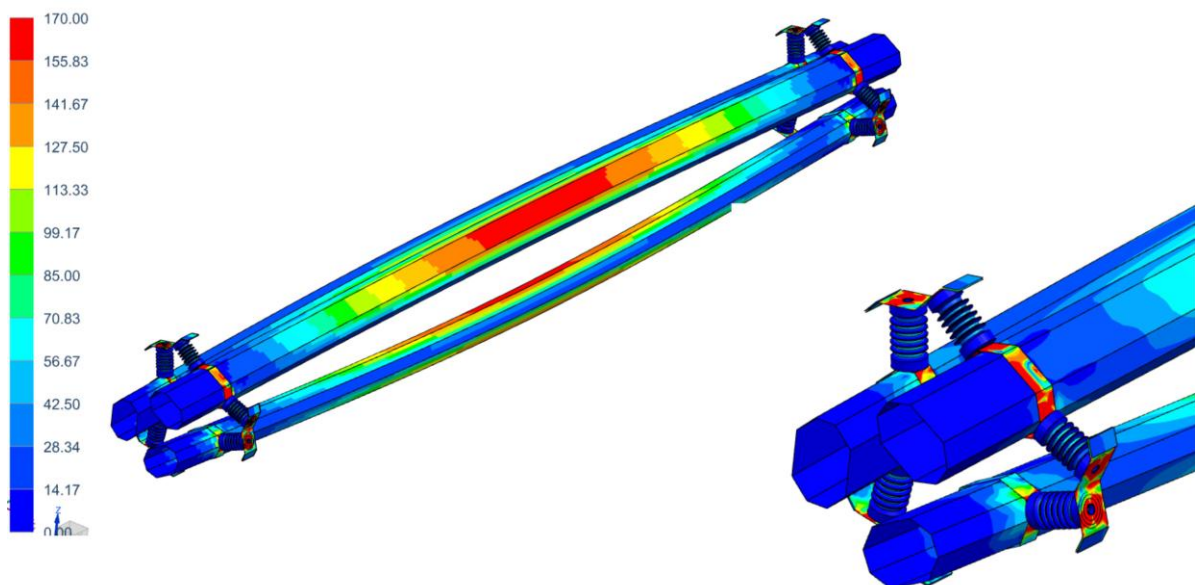
Na rysunku 8a i b przedstawiono deformację modelu szynoprzewodu w chwili, kiedy siły pola elektromagnetycznego  $F_m=27405N$  odpychają przewody od siebie (przypadek grozi uderzeniem przewodu w rurę osłonową) a na rys.8c w chwili, kiedy siły  $F_m=-27405N$  przyciągają przewody do siebie (przypadek grozi uderzeniem przewodów o siebie).



Rys.8 Warstwie deformacji modelu o wymiarach nominalnych,  $mm$

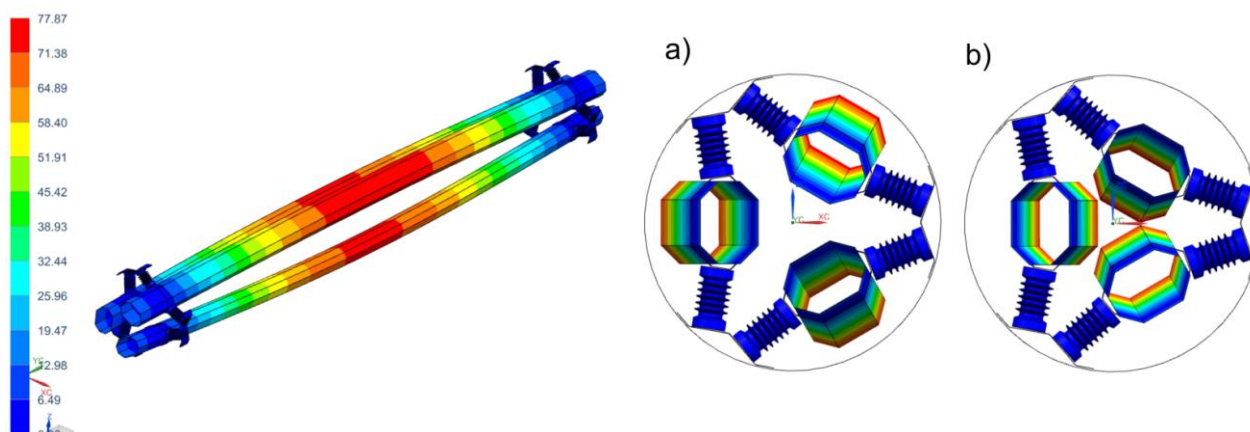
Analizując wyniki obliczeń (rys.7) można zauważyć że wartości naprężeń zredukowanych uzyskanych dla modelu o wymiarach nominalnych są mniejsze od minimalnej umownej granicy plastyczności  $R_{e02}=170MPa$  dla materiału przewodów – zatem przewody nie odkształcają się plastycznie. Również maksymalne ugięcie przewodów modelu nominalnego (rys.8) zarówno dla sił odpychających przewody (rys.8a i b) jak i przyciągających przewody (rys.8c) wynoszące około  $63mm$  nie grozi uderzeniem przewodów o rurę osłonową ani o siebie. Przypadki b) i c) nie wykazują symetryczności, bowiem działają siły od ciężaru wasalnego konstrukcji.

Ponieważ analizowana konstrukcja szynoprzewodu o nominalnym rozstawie podpór  $4m$  jest bezpieczna w stanie przewodzenia udarowego prądu zwarcia, można powiększyć rozstaw podpór do granicznej z uwagi na bezpieczeństwo eksploatacji wartości. Aby wyznaczyć taki rozstaw zbudowano i przeanalizowano kolejne podobne modele obliczeniowe z różnymi rozstawami podpór. Modelem szynoprzewodu, który spełniał wymagania bezpiecznej eksploatacji zapewniając największy rozstaw podpór był model, w którym wyniósł on  $4,36m$ . Na rysunku 9 przedstawiono warstwie naprężeń zredukowanych dla modelu szynoprzewodu o rozstawie podpór równym  $4,36m$ .



Rys. 9 Warstwie naprężeń zredukowanych dla modelu o rozstawie podpór  $4,36m$ ,  $mm$

Na rysunku 10 dla sprawdzenia przedstawiono deformację modelu, pod działaniem sił pola elektromagnetycznego dla przypadku odpychania przewodów od siebie (rys.10a i b) i przyciągania przewodów (rys.10c).



Rys10. Warstwicę deformacji modelu szynoprzewodu o rozstawie podpór 4,36m, mm

## PODSUMOWANIE

Konstrukcja szynoprzewodów stosowanych w energetyce wynika nie tylko z konieczności zapewnienia odpowiedniej przewodności i wynikającego z niej przekroju przewodów lecz również z wymagań wytrzymałości mechanicznej i sztywności. Stanem pracy przewodu stwarzającym największe zagrożenie jest przepływ udarowego prądu o dużej wartości podczas zwarcia. Opisany model dyskretny MES i przeprowadzona z jego pomocą analiza wykazały, że segment szynoprzewodu o rozstawie podpór 4m, ma wymaganą wytrzymałość i sztywność, i nie stwarza zagrożenia podczas przewodzenia prądu zwarcia.

Aby zmniejszyć koszt szynoprzewodu, można powiększyć rozstaw podpór a tym samym jego długość o około 10%, przy zachowaniu bezpieczeństwa eksploatacji.

Z przeprowadzonej analizy wynika, że istnieje możliwość dalszego powiększenia długości segmentu szynoprzewodu, a tym samym obniżenia jego kosztu, jednak wymagałoby to zmian w jego przekroju poprzecznym. Gdyby producent zdecydował się na takie zmiany, z pomocą modelu MES można by przeprowadzić kompleksową optymalizację wymiarów szynoprzewodu np. z uwagi na koszt jego jednostki długości.

## LITERATURA

- [1] Adams V., Askenazi A., *Building Better Products with Finite Element Analysis*, OnWord Press, 1999.
- [2] PN-90/E-05025: *Działanie elektromagnetyczne na przewody sztywne i giętkie*.
- [3] NX Nastran Help